

私立東海大學資訊工程學系研究所

碩士論文

指導教授：林祝興 博士

Dr. Chu-Hsing Lin

植基於旋轉取樣測位之室內定位系統研究

**An Indoor Location-aware System Based on
Rotative Sampling Positioning**

研究生：李建興

(Chien-Hsing Lee)

中 華 民 國 一 〇 〇 年 六 月

東海大學碩士學位論文考試審定書

東海大學資訊工程學系 研究所

研究生 李 建 興 所提之論文

植基於旋轉取樣測位之室內定位系統研究

經本委員會審查，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員會
召集人

詹進科

簽章

委員

詹進科

陳永宗

楊中皇

指導教授

林德

簽章

中華民國 100 年 6 月 28 日

摘要

近幾年來，由於無線通訊技術在軟硬體方面的快速發展，使得即時定位系統已被廣泛的應用於日常生活中，其中又以全球定位系統（Global Position System, GPS）最為成熟普及。然而針對室內定位的應用方面，因為受到建築物遮蔽以及多路徑效應等影響，衛星訊號強度顯得微弱而失去定位上的參考價值，因此利用無線感測網路（Wireless Sensor Network）技術來達到室內定位的目的，再次地引起許多學者投入相關的研究與應用，例如無線遠端居家醫療看護與展覽場的自動導覽系統等方面。本文則是以符合 IEEE 802.15.4 標準的 ZigBee 網路無線技術為基礎，根據接收的訊號強度值，以訊號特徵比對（Signal Pattern Matching）法作為主要的定位方法，實驗中將針對定位階段之比對樣本的取樣方法進行研究，利用旋轉取樣測位的方式來提升定位的準確度。其地點預測準確度有 52% 的定位誤差可控制在 60 公分以下，因此可推斷旋轉取樣測位對小空間的室內定位而言，是較佳的定位訊號取樣方式。

關鍵詞：無線感測網路，室內定位，旋轉取樣，接收訊號強度

Abstract

In recent years, due to hardware and software rapidly developed of wireless communication technology, making real-time location systems have been widely used in many applications. However, for indoor positioning applications, as radio signals covered by buildings and other effects of the satellite signal strength, the signals are unstable to apply to indoor location. Nowadays, the wireless sensor network technology implements indoor positioning. This thesis is based on the IEEE 802.15.4 standard—ZigBee network, we utilize the received signal strength (RSS) value as signal fingerprint, the method is Signal Pattern Matching which is the primary method for indoor positioning in this thesis. We also employ rotating sample-measuring to enhance the positioning accuracy and decrease measurement time costs. By the experimental results, our method —Rotative Sampling Positioning places forecast that the accuracy has 52% position error to be possible to control below 60 cm, therefore we infer Rotative Sampling Positioning is the suitable method in indoor positioning.

Keyword: wireless sensor network, indoor location, rotative sampling, received signal strength

致謝

本篇畢業論文的完成，首先最感謝我的指導教授林祝興博士在學術研究上的教導，另外也要感謝建興的碩士班口試委員：詹進科教授、楊中皇教授以及陳雍宗教授。由於教授們的指導及叮嚀，使得這篇碩士畢業論文更加充實與完整。

還要感謝東海大學資訊安全實驗室的夥伴們，由於你們的協助與參與，讓我能夠專注準備畢業論文及口試。其中特別要感謝提供寶貴意見的學妹逸竹與同甘共苦的戰友昇興，如果沒有你們的協助與鼓勵支持，我的畢業論文亦無法順利的完成。

同時要感謝永遠在背後給我最大支持與包容的老婆穎儀，在這修業期間真的辛苦妳了，因為有妳，讓我能更專心於學業及論文的研究上，使我能順利的完成碩士學位。

最後再次感謝我的家人與師長及同學們，感謝你們的支持、包容、鼓勵與協助，在此建興致上最高的心意與感謝。謝謝大家。

李建興 謹上

中華民國一〇〇年七月 於東海

目錄

第壹章 序論.....	5
第一節 研究背景.....	5
第二節 論文架構.....	7
第貳章 相關研究.....	8
第一節 ZigBee簡介.....	8
第二節 定位技術類型.....	13
第參章 實驗環境.....	19
第一節 定位環境介紹.....	19
第二節 定位系統與設備介紹.....	20
第肆章 研究方法.....	23
第一節 定位流程架構.....	23
第二節 系統實作方法.....	25
2.1 訊號強度資料庫建立.....	25
2.2 定位訊號取樣設計.....	27
第三節 定位演算法.....	29
第伍章 實驗結果與分析.....	31
第一節 模擬式資料庫之效能分析.....	32
第二節 取樣方法之準確度比較.....	33
第陸章 成果討論與結論.....	37
第一節 實驗成果討論.....	37
第二節 結論.....	38
參考文獻	39

圖目錄

圖 1: ZigBee通訊協定架構.....	9
圖 2: ZigBee 在硬體架構的角色.....	11
圖 3: ZigBee 在網路架構的角色.....	13
圖 4: TOA 運作過程.....	14
圖 5: TDOA 運作過程.....	15
圖 6: AOA 運作示意圖.....	16
圖 7: 實驗環境配置圖.....	19
圖 8: 閘道器.....	20
圖 9: 感測節點.....	21
圖 10: 定位標籤.....	21
圖 11: 自動轉盤.....	22
圖 12: 訊號特徵比對法流程架構圖.....	24
圖 13: 資料庫建立之實作流程圖.....	26
圖 14: 全部測量示意圖.....	27
圖 15: 跳格測量示意圖.....	27
圖 16: 定位訊號取樣之實作流程圖.....	28
圖 17: 訊號強度與距離關係圖.....	31
圖 18: 使用模擬式資料庫的比較圖.....	32
圖 19: 固定與旋轉定位標籤方式比較.....	33
圖 20: 環境中人體移動干擾的影響.....	34
圖 21: 取樣方法之準確度比較.....	34
圖 22: 定位誤差分布圖-Case 1.....	35

圖 23: 定位誤差分布圖-Case 2.....	35
圖 24: 定位誤差分布圖-Case 3.....	36
圖 25: 取樣方法之定位分布比較.....	36

表目錄

表 1: Zigbee 規格.....	10
表 2: 公式(3)符號說明.....	17
表 3: 不同定位方法之比較.....	18
表 4: 實驗設計.....	29

第壹章

序論

第一節 研究背景

近年來，由於無線通訊技術的成熟以及可攜式設備的廣泛使用，量測系統趨向於無線化、小型化、模組化、網路化及經濟與省電化發展，人們對於定位應用的需求日益增大，以無線網路為基礎之即時定位服務，即成為現今相當熱門的研究議題之一 [1]。也因為無線網路具有最省電、最大網路節點數及最低成本等優點，專為低成本多節點的低功耗網路所應用，因此，近年已有更多應用在室內定位的技術與演算法相繼被提出來，而無線感測的定位技術在居家生活、環境監控、甚至是商業、軍事上的應用也多被普遍運用 [2]。而在各個應用領域上，為了達到提供即時準確的服務需求，都必須使用到定位的技術，例如在居家看護領域，將無線感測器放置於被照護者身上，可以觀察該人員的活動情形以及身體狀況，如在發生緊急狀況時自動發出警告訊息，並即時取得被照護者的位置與履歷資料，以發揮即時的醫療監控服務。在導覽服務領域，利用定位系統的即時資訊服務，搭配具有無線感測器的行動裝置，提供視障者位置情報的導盲服務，或者是展場、購物中心多國語言的客戶導覽服務，來顯示展覽品相關資訊與環境資訊等。在貨物倉儲管理領域，透過無線感測器的輔助，可以較容易的了解相關貨物的放置位置，配合上自動化倉儲系統，可以正確的將物品自動送到所需的位置，減少額外人工盤點與存取貨物的動作 [3][4][5]。

由於衛星定位系統目前於室外定位之應用上已趨近成熟，但是在室內的應用上卻礙於遮蔽物的干擾，而降低定位的準確度，因此，本文將針對室內定位方面進行研究，以學校會議室做為室內定位實驗區域，將測試如何在室內空間中去建置定位系統，通常室內定位系統絕大部分是透過額外的硬體來達成定位需求，但是這樣的系統架構在實作時，必然會提高初期的建置成本 [6]。所以，另外一種室內定位之可行性方法，則是直接使用無線電波會隨著傳輸距離而有不同程度能量衰減的特性，來完成定位之目的，亦即將已知的接收訊號強度指標 (Received Signal Strength Indicator, RSSI) 視為關鍵定位參數，因為電波訊號在空氣傳輸的過程中，隨著傳播距離而有不同程度之能量衰減，藉由RSSI的物理特性為基礎，並使用訊號特徵比對法計算出定位目標可能的位置，來達到室內定位所需的精確度 [7]。

因為無線感測器上的天線特性而產生的方向性問題，造成在同樣位置距離但不同方向下所發送的訊號，因為感測器傳送的角度不同，收到的訊號強度值可能不一樣，這是天線特性影響訊號產生的不穩定。因此在無線感測網路中，RSSI值除了會受到外在環境的干擾之外，亦有方向性問題導致不規則的訊號強度值。而目前透過RSSI定位的相關方法上，在定位的準確度上仍有著極大的改善空間，在本論文中，我們將針對室內定位的環境，提出一個利用旋轉取樣測距的方式，以期降低節點間互相傳送的訊號強度因方向性所造成的不穩定問題，進而提升定位準確度。

通常室內定位系統的節點有兩種類型，分別為信標節點 (Beacon Node) 以及目標物節點 (Object Node)，以本論文所使用的系統為例，信標節點即為感測節點 (Location Node) 視為網路中的參考節點，而目標物節點即為定

位標籤 (Location Tag) 視為網路中的欲定位節點。可依照使用者的不同需求，來部署多個感測節點於欲定位的區域中，並透過定位標籤在欲定位的區域中活動，由定位標籤主動進行封包廣播，在訊號涵蓋範圍內的感測節點皆可接收該封包，再依據不同的演算法加以輔助，計算出該封包訊號的特徵值，例如：到達角度、訊號強度、到達時間等，來進行取樣特徵與強度資料庫比對，以定位到相對應的實際位置。

第二節 論文架構

本論文共分為六章，架構安排如下：

第一章：序論，說明研究背景與文章架構。

第二章：相關研究，簡介 ZigBee 並說明定位相關技術。

第三章：實驗環境，介紹實驗環境與設備。

第四章：研究方法，描述定位流程架構與實驗方法。

第五章：實驗結果與分析，將提出實驗的結果並進行分析比較。

第六章：成果討論與結論，針對實驗的成果與應用討論作為總結。

第貳章

相關研究

第一節 ZigBee 簡介

隨著無線感測網路 (Wireless Sensor Network, WSN) 的普及化, 使得利用無線網路技術完成室內定位服務的可行性更為提高, 如展場、倉庫、圖書館、購物中心和室內停車場等複雜的室內環境, 經常需要確定移動手持終端與設備或物品在室內的位置。由於現今的無線感測網路並無統一的規格制定其通訊協定, 因此以 ZigBee 聯盟 (ZigBee Alliance) 公佈之低傳輸率無線個人區域網路 (Low-Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN) 通訊協定, 比較符合無線感測網路之特性。目前無線個人區域網路 (Wireless Personal Area Network, WPAN) 技術有三種公開的標準, 分別是 Bluetooth、WiMedia 與 ZigBee, 其中 Bluetooth 主要應用於短距離無線語音傳輸, WiMedia 主要應用為短距離無線多媒體傳輸, 而 ZigBee 則較適用於低功耗的短距離無線資料傳輸。ZigBee 為無線個人區域網路的標準之一, 其實體層 (Physical Layer, PHY) 以及媒體存取層 (Medium Access Control Layer, MAC) 是基於 IEEE 802.15.4 而制定的通訊協定標準, 該標準定義了 RF 射頻以及與相鄰裝置之間的通訊協定, 使網路中的裝置可以在此協定下互相傳送所測到的定位資訊 [8][9][10]。

ZigBee 聯盟是由世界各大公司所組成。2002 年下半年, 英國 Invensys 公司、日本三菱電氣公司、美國摩托羅拉公司以及荷蘭飛利浦半導體公司四大巨頭宣布將加盟“ZigBee 聯盟”, 以研發 ZigBee 的下一代無線通訊標準, 其架構由下而上分別為實體層 (PHY Layer)、媒體存取控制層 (MAC Layer)、網路層 (Network Layer) 與安全層 (Security Layer) 以及應用層 (Application

Layer) 等，詳細架構如圖 1 所示。ZigBee 聯盟致力推廣高可靠度、低耗電、低成本及無線多節點監控產品，希望能成為世界通用的應用標準。ZigBee 技術需求崛起之初期原因為針對無線設備控制，以達到能源控管與節約能源之目的，至今發展目標則是朝向自動化控制與遠端監控之應用。聯盟目前針對家庭自動化 (Home Automation)、智慧型大樓 (Building Automation)、工廠自動化 (Industrial Automation) 三大領域制定相關應用標準，例如：家庭節能科技、醫療看護管理、自動化倉儲...等皆為目前被廣泛應用的範疇。Zigbee 協定是一種短距離、低傳輸速率的無線網路技術，其強調低成本、低功率消耗之特點，通常傳輸距離約 50 至 100 公尺，並依耗電量之不同可有更長的傳輸範圍，所使用之頻道為 2.4GHz 與 900MHz，傳輸速率為 20Kbps 至 250Kbps，其標準規格如表 1。因此 ZigBee 網路具有低部署成本、低功率損耗、低資料傳輸率以及無線網路多節點控制...等優點，將提供無線裝置只需要以裝載電池的方式，在規範裝置消耗電力為 40mA，且睡眠模式消耗不到 40 μ A 的電力的優勢之下，即能使裝置維持數月甚至更久的電源壽命，在相同的條件下，此項優勢確實比 Bluetooth 技術顯得更為優異，因此本論文將採用 ZigBee 系統來做為室內定位研究的設備，以完成定位系統之實作，其相關技術介紹如下。

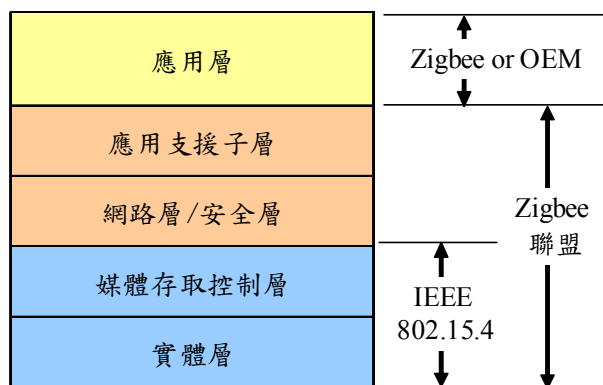


圖 1：ZigBee 通訊協定架構

表 1：Zigbee 規格

工作頻率	868 MHz	915 MHz	2.4 GHz
適用區域	歐洲	美國	全球
頻段屬性	-	ISM	ISM
調變方式	BPSK	BPSK	QPSK
使用頻道數	1	10	16
最高傳輸速率	20 Kbps	40 Kbps	250 Kbps
最高傳輸距離	300 M	30~75 M	10 M

以IEEE 802.15.4為基礎，ZigBee技術主要包括以下特性：

(1) 低功耗：

在待機模式下，Zigbee將進入休眠狀態，在工作與睡眠模式之間的轉換時間約只有15ms，而且設備搜索時間也只需為30ms。故減少需要經常換電池或充電的麻煩，這項省電的優勢，更是Zigbee最引以為傲的獨特優勢。

(2) 低成本：

因為Zigbee的數據傳輸速率較低、架構較單純，且通道化的規則簡單、不跳頻以及使用單一收發頻率，因此大幅降低軟硬體上的設計成本。

(3) 網路容量大：

在無線感測網路中，透過ZigBee Coordinator，可以有將近6萬5000多個Zigbee網路節點存在，相較於Bluetooth的8個節點，或者是Bluetooth Lite的256個，在擴充性上可以說是提高了許多。

(4) 高安全性：

Zigbee提供了資料完整性檢查與權限功能，硬體本身支援CRC和AES-128編碼，因此可以應用於高安全需求的環境中。

在網路層方面，ZigBee可支援叢集（Cluster Tree）、網狀（Mesh）和星狀（Star）拓撲三種網路架構 [11]。從硬體架構來看，各個節點的角色可分

為兩種，分別是為全功能設備（Full Function Device，FFD）與精簡功能設備（Reduced Function Device，RFD），如圖2所示，其特性介紹如下：

1. 全功能設備（FFD）：

- 提供完整IEEE 802.15.4規範的功能
- 使用較高的運算效能以及記憶體
- 電路較為複雜
- 通常採用固定的電源

2. 精簡功能設備（RFD）：

- 提供精簡的IEEE 802.15.4規範的功能
- 使用較低的運算效能以及記憶體
- 電路較為簡單
- 通常使用電池

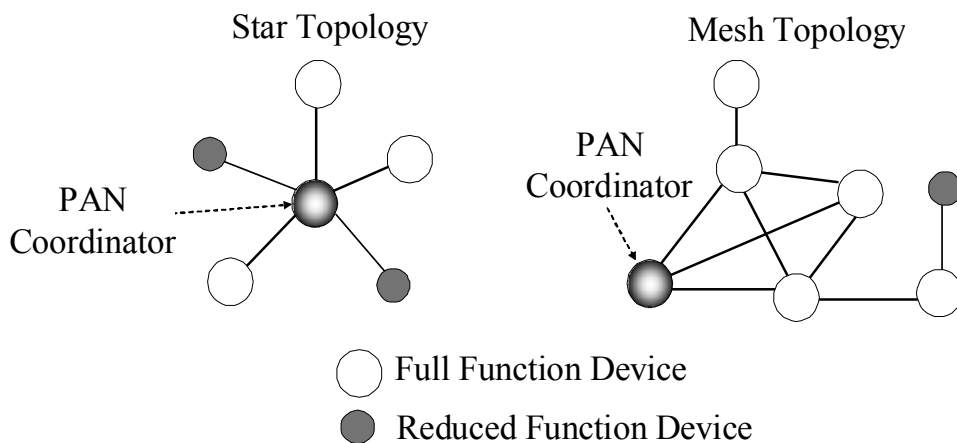


圖 2：ZigBee 在硬體架構的角色

以網路架構來看，ZigBee 裝置的角色共可分為 ZigBee Coordinator（協調者）、ZigBee Router（路由器）、ZigBee End Device（終端設備）等三種 [12]，如圖 3 所示，各個角色功能說明如下：

1. ZigBee Coordinator : (FFD)

- 整個 Zigbee 網路的管理控制中心
- 分配網路位址並規範分配原則
- 可加入與離開某個網路
- 對封包做安全性處理
- 繞送封包到目標節點
- 找尋並維護節點間的繞送路徑
- 搜尋鄰居節點
- 儲存鄰居節點的相關資訊

2. ZigBee Router : (FFD)

- 負責延展 Zigbee 網路的路由
- 可加入與離開某個網路
- 對封包做安全性處理
- 繞送封包到目標節點
- 找尋並維護節點間的繞送路徑
- 搜尋鄰居結點
- 儲存鄰居節點的相關資訊

3. ZigBee End Device : (RFD or FFD)

- ZigBee 網路的終端裝置
- 負責收集資訊並透過 ZigBee 協定交換訊息。

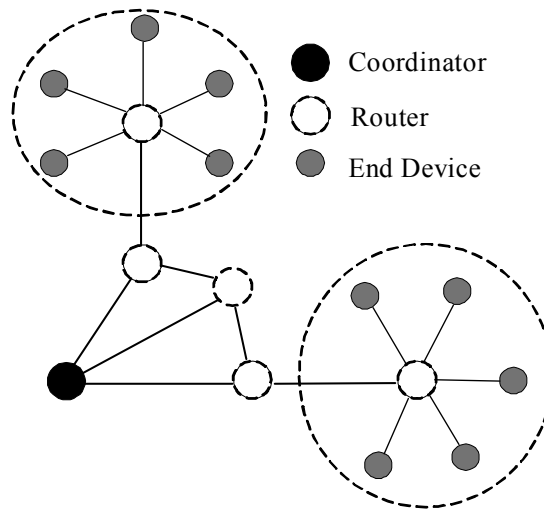


圖 3：ZigBee 在網路架構的角色

第二節 定位技術類型

近年來關於無線感測網路的研究相當地廣泛，其中感測器的定位問題則是一個相當重要的議題，目前在無線網路環境下進行定位服務的相關定位方法中，大致可區分為下列兩種模式：分別為 Range-base 和 Range-free [13][14][15]。第一種為 Range-base 模式，需要透過感測節點與定位標籤的距離、角度或時間差等資訊來量測距離，定位較為準確但是需花費額外的設備成本以求得精準的資訊，相關方法大致有以下四種：訊號到達時間 (Time of Arrival, TOA)、訊號到達時間差 (Time Difference of Arrival, TDOA)、訊號到達角度 (Angle of Arrival, AOA)、接收訊號強度 (Received Signal Strength, RSS)，第二種為 Range-free 模式，其不需要得知感測節點與定位標籤的距離和角度資訊即能判斷定位，準確度較 Range-base 差，但不需利用額外的設備來求得距離和角度資訊，也較適合應用在講究低功率與低成本的無線感測網

路中，相關方法如：DV-Hop、訊號特徵比對法（Signal Patent Matching）。針對上述定位方法將簡單說明如下：

(1) TOA 定位法：

TOA 定位法是較常見的距離量測方法，一般常用傳播速度較慢的訊號來達成（如超音波），主要是由訊號的傳播時間來決定訊號範圍半徑。藉由傳送端發射訊號到接收端的傳播時間可知，將訊號傳播時間乘上傳播速度，則可估算出定位標籤到感測節點之間的距離。其運作過程說明如圖 4 所示，首先由傳送端發送一個超音波訊號到接收端，接收端收到後隨即回應一個訊號給傳送端，經過時間差計算求得訊號傳播的時間，再與訊號傳播的速度 V 相乘，即能推算出感測節點與定位標籤的距離，如公式 (1)。通常需要透過三個感測節點，分別計算與定位標籤的距離，最後利用三點定位法來推估定位標籤在室內的相對座標。隨者不同訊號源的傳播速度越快，定位的誤差也會越大，由此可知此法對於時間的敏感度非常高，所以需要定位標籤與感測節點兩者的時間有精確的同步，即使是幾微秒的時間誤差，也可能導致很可觀的定位距離誤差 [16][17]。

$$Distance = \frac{((T_3 - T_0) - (T_2 - T_1)) * V}{2} \quad (1)$$

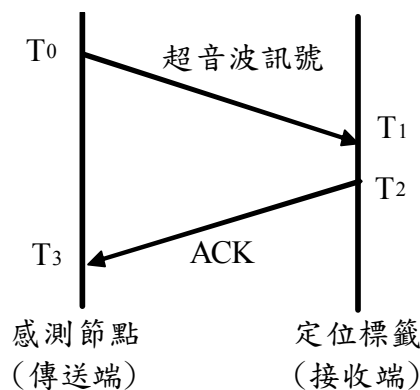


圖 4：TOA 運作過程

(2) TDOA 定位法：

TDOA 定位法乃是針對 TOA 可能產生的定位誤差進行改良，主要是利用定位標籤所發射的兩個傳輸速率不同的訊號（常見如無線射頻與超音波），由感測節點根據這兩種訊號到達的時間差，輔以三點定位公式來計算定位標籤實際的位置。其訊號傳輸過程如圖 5 所示，傳送端首先在 T_0 時發射無線電射頻隨後又在 T_2 時發射超音波訊號，接收端利用這兩種訊號的到達時間差，根據無線電射頻速度 V_1 與超音波速度 V_2 ，透過公式 (2) 來計算感測節點與感測標籤之距離。不同於 TOA 直接利用一種訊號到達時間的方法，故 TDOA 定位精度較高，可降低定位標籤硬體本身存在的誤差偏移值，目前已成為重要的研究議題 [18][19][20]。

$$Distance = ((T_3 - T_1) - (T_2 - T_0)) * \frac{V_1 * V_2}{V_1 - V_2} \quad (2)$$

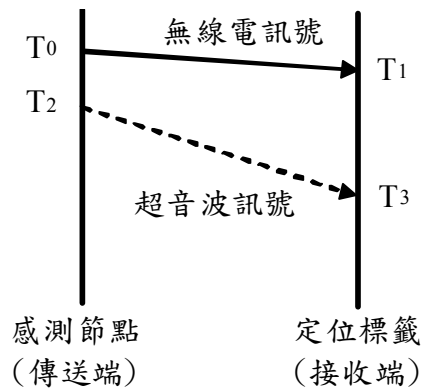


圖 5：TDOA 運作過程

(3) AOA 定位法：

AOA 定位法的基本原理是利用具方向性的天線 (Directional Antenna) 或天線陣列 (Antenna Array)，量測電磁波的相位差並計算得入射角度，並偵測

出定位標籤訊號來源的方位角度。如圖 6 所示，此法只需要由兩個感測節點接收的訊號入射角度，加上已知兩個感測節點的座標位置，利用三角定理求得定位標籤訊號相對於兩個感測節點的距離，即能進一步計算感測標籤的相對位置，其定位精確度會隨著定位標籤與感測節點距離增加而降低，所以感測節點的天線需要改進，可以配置方向性更強的陣列式天線 [21][22][23]。

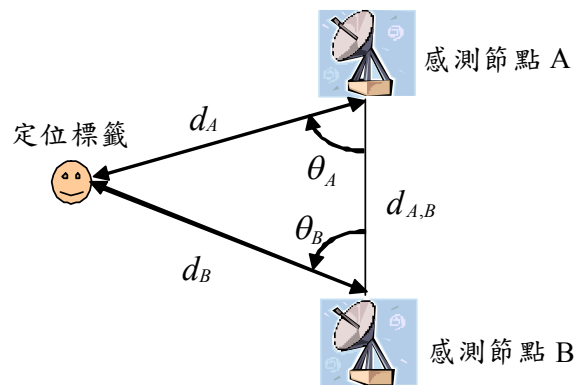


圖 6：AOA 運作示意圖

(4) RSS 定位法：

RSS定位法是以無線電訊號具有訊號強度隨著距離衰減的特性為基礎，利用感測節點接收到的訊號強度指標 (Received Signal Strength Indicator)，再將所得知的訊號強度換算成距離。測量一次訊號強度可以把定位標籤鎖定在以感測節點為中心的軌道上，圓的半徑即由訊號強度值決定，通常至少需要透過三個感測節點才能判斷定位標籤的位置，當感測標籤與感測節點的距離越遠，其訊號的強度將呈現隨著傳播距離做指數衰減的特性，其訊號衰減程度如公式 (3) 所呈現。由於無線訊號傳輸在室內可能因不同物體的擺設，呈現多重路徑、反射及散射的干擾，進而產生衰弱與遮蔽效應，於是將產生預測定位的距離誤差 [24][25]。

$$P(d) = P(d_0) - 10 n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3)$$

表 2：公式 (3) 符號說明

符號	說明
$P(d)$	收到的訊號強度集合平均
$P(d_0)$	極短距離 d_0 所收到的訊號強度
d_0	極短的參考距離
n	路徑衰減指數，一般介於 2 到 4

(5) DV-Hop 定位法：

DV-Hop 定位法概念上是利用感測節點跟定位標籤之間的跳躍數 (Hop) 與平均一個跳躍單位的距離，來推估彼此之間的跳躍距離。首先求得網路中所有感測節點之間的跳躍數，第二階段由感測節點計算網路平均每跳的距離，再將其作為一個校正值 (correction) 廣播至網路中，當接收到校正值後，節點根據跳數計算與節點之間的距離。一般而言，需要收集跟三個參考點以上的座標資訊，感測節點即可以藉由這些資訊推估出自己的位置，但是當感測節點於網路環境中部署不平均，此時產生的跳躍數的距離，會產生非常大的誤差，最終導致定位不準確 [26]。

(6) Signal Patent Matching 定位法：

此定位法又稱為訊號特徵比對法，主要以 RSS 概念為基礎，其工作原理是透過定位標籤與感測節點之間無線訊號的發射與收集之交互運作行為，得

知定位標籤的訊號強度，但是並非直接依據訊號強弱判斷彼此距離遠近，而是將訊號強度視為該環境的特徵，將感測節點收到的樣本訊號強度與事先建置的環境資料庫做比對，進而推估定位標籤可能的位置。此法一般可分為訓練與定位兩階段，其相關運作流程將於後續章節作進一步的探討，也由於此種定位技術比較簡單，且所需成本較低，因此目前已有許多的研究以發展不同演算法，來提升定位結果的準確度 [27]。

由於 TOA、TDOA、AOA 定位法需要增加額外的硬體裝置甚至需要較複雜的演算，而 RSS 定位法則是採用感測節點內建的通訊元件來偵測訊號強度，具有低成本不需修改硬體與運算簡單的優點，各種不同定位法都有各自的特點，其相關優缺點比較如表 3。對於定位精度較高的方法，則同時增加硬體成本，並且根據具體應用上的需求，定位的條件與要求亦有所不同，所以必須針對實際業務不同的需要而採用較適合的定位方法。因此在本實驗的室內定位研究上，將採用 RSS 為基礎概念，透過訊號特徵比對法定位流程，將訊號強度視為環境的特徵，並利用相關定位演算法輔助來計算定位節點位置，以符合無線感測網路低成本、低功耗之需求。

表 3：不同定位方法之比較

定位方法	特色	優點	缺點
TOA	以訊號到達時間測距	◆演算法簡單	◆需要額外硬體做時間同步
TDOA	以兩種不同訊號到達時間差測距	◆不需與感測節點做時間同步 ◆提升TOA之準確度50%	◆需要額外硬體傳送不同訊號 ◆演算法較複雜
AOA	以收訊角度測距	◆演算法簡單 ◆只需兩個感測節點可完成定位	◆至少需配備一對方向性天線 ◆大範圍之定位準確度較低
RSS	以接收訊號強度測距	◆演算法簡單 ◆成本較低 (感測節點內建偵測元件)	◆大範圍之定位準確度較低

第參章 實驗環境

第一節 定位環境介紹

首先介紹實驗的環境與使用之相關實驗設備，本實驗環境如圖 7 所示，為長十公尺、寬四點五公尺的長方形室內空間，四周包含白板一塊，鐵製書櫃及電腦桌若干個（灰色區域）。事先將中間 6x3 公尺的空間規劃成 11x6=66 個訓練點，編號依序為：B1、B2...B6 至 L1、L2...L6 等等，每一個訓練點的相鄰距離為 60 公分，並且平均地部署 6 個感測節點於天花板上（藍色虛線），另外將開道器裝設於定位空間的正中央（紅色虛線），。

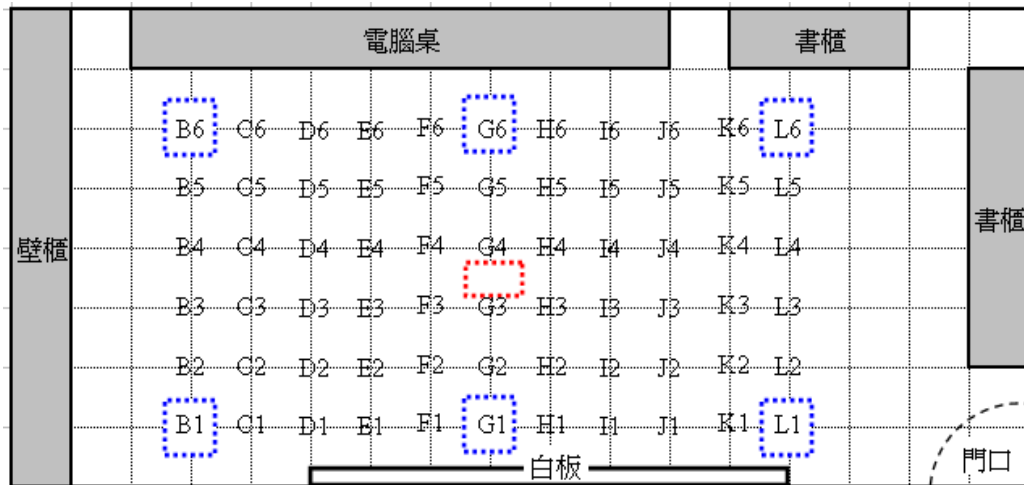


圖 7：實驗環境配置圖

第二節 定位系統與設備介紹

本實驗中所用的即時定位系統是由源鼎科技所開發之套件 (iTracer EasyKit)，其感測器中的收發模組晶片之通訊協定，遵循著以IEEE802.15.4協定為設計基礎，進而完成整個無線感測網路定位系統之實作。其主要特色如下：省電且即時定位、適用於以房間為單位的定位、定位標籤具備雙向溝通的能力等，實驗設備除了進行資料收集與運算的筆記型電腦以及一個協助定位標籤旋轉的自動轉盤外，主要為此系統架構所組成的三大元件，分別為一個閘道器，六個感測節點，以及一個定位標籤，其功能簡介分別如下：

- 閘道器 (FT-6310 Extension Gateway)：

其配備一支天線，無線網路的中心，包含 ZigBee Coordinator 和 ZigBee To Ethernet Bridge 兩大功能，能將 ZigBee 無線網路接收的訊號橋接到 Ethernet 上，結合 Internet 網路上的電腦進行資料的運算，放置於本實驗中 G3 與 G4 之間的位置，外觀如圖 8 所示。



圖 8：閘道器

- 感測節點 (FT-6340 Location Node)：

其採用指向型天線的設計，提供更明確的訊號特徵，在無線網路中為扮

演 Router 的角色，以提供定位所需要的信標 (Beacon)，並將參考點資訊與接收到的強度值傳回給定位標籤，本實驗共使用了六個感測節點，並且平均部署於實驗環境中的 B1、B6、G1、G6、L1 與 L6 的位置，外觀如圖 9 所示。



圖 9：感測節點

- 定位標籤 (FT-6360 Location Tag)：
其具備低耗電且可充電之設計，功能是廣播信標需求 (Beacon Request) 封包給訊號涵蓋範圍內所有感測節點，並於一段時間內將所收集到的所有信標及其收到的訊號強度集中，透過閘道器傳回給電腦去做進一步的計算，外觀如圖 10 所示。



圖 10：定位標籤

- 自動轉盤：

透過外接電源之自動轉盤，主要目的為協助定位標籤進行 360 度旋轉，使得定位標籤內建的訊號通訊元件，可以均勻地在每一個方向傳送與接收，外觀如圖 11 所示。



圖 11：自動轉盤

第肆章

研究方法

第一節 定位流程架構

本節將介紹論文中針對室內定位主要的實驗方法與定位演算法，實驗中採用訊號特徵比對法作為主要的定位技術，其流程架構如圖 12 所示。這種利用訊號強度來達到定位的技術亦稱為樣本比對法 (Pattern Matching)，即不需要知道感測節點與定位標籤的距離和角度關係，而是將訊號強度值當成欲定位環境中訓練點的特徵，把定位標籤所收集到訊號強度與訊號強度資料庫中各個訓練位置 (Training Location) 的特徵進行比對，透過定位演算法輔助估算出定位標籤可能的位置。基於每一個位置所收到各個參考點的訊號強度特徵都不同的假設下，可藉由此特性有效的降低因環境干擾造成訊號強度不穩定而導致的定位誤差。通常此定位過程可分為兩個階段，第一階段為訓練階段，以及第二階段為定位階段，茲分別介紹如下。

訓練階段 (Off-line) 又稱為離線作業，在此階段主要工作為收集所有參考點到各個訓練位置的訊號特徵，以完成訊號強度資料庫建置。首先將定位環境劃分為網格狀形成多個訓練點，並分別把感測節點部署於環境之中形成無線感測網路中的參考點，每一個訓練點分別透過定位標籤發出訊號，並記錄由至少 3 個感測節點所收到的訊號強度，然後將收集到的資料透過閘道器傳回後端的電腦處理，最後建成該環境的訊號強度資料庫。基本上，收集到的樣本強度越多，對於最終定位的準確度幫助越大。

定位階段 (On-line) 又稱為線上作業，此階段的目的是利用定位標籤在定位點收到的訊號強度樣本，透過與訊號強度資料庫內各訓練點的特徵進行樣本比對，根據不同的定位演算法輔助計算，以產生最終定位的結果。

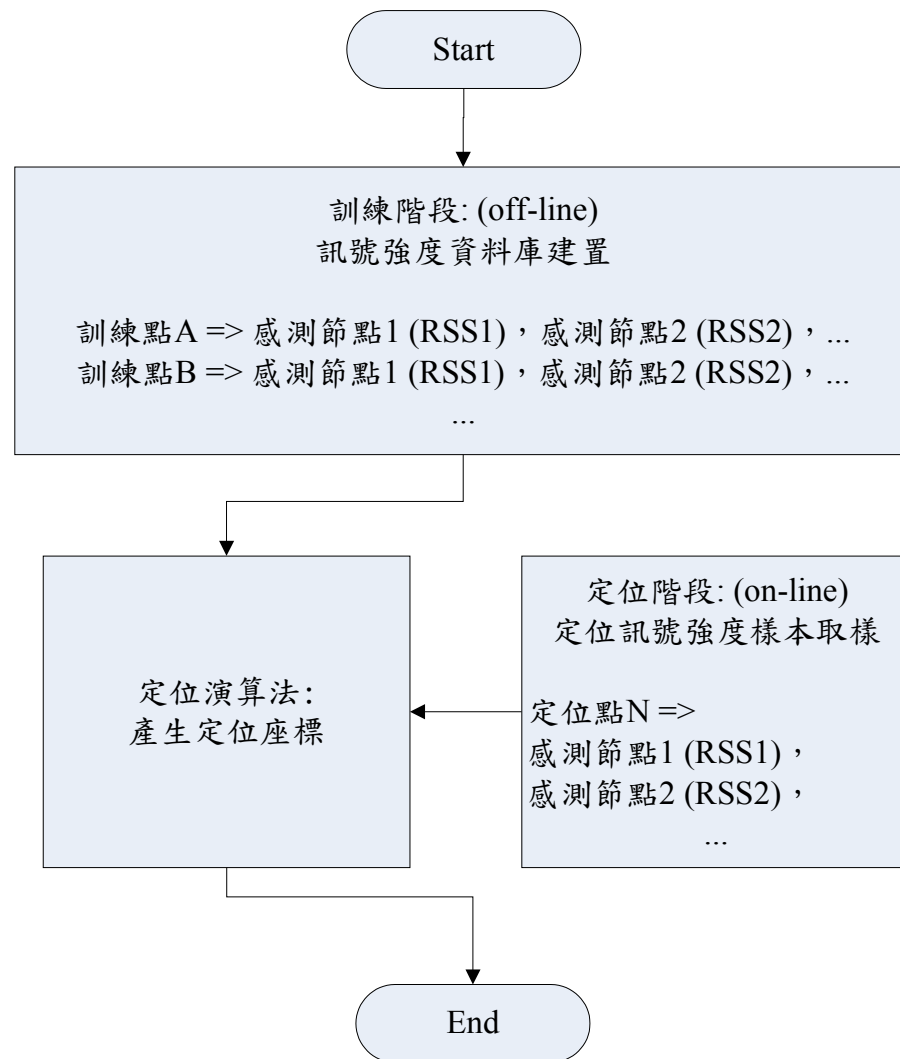


圖 12：訊號特徵比對法流程架構圖

第二節 系統實作方法

針對室內靜態定位的實作上，主要可將實驗分為下列三個步驟：

(1) 放置定位標籤，量測訊號強度與測得次數

將定位標籤輪流放置於實驗所規劃的 66 個不同地點，在部署 6 個感測節點的室內環境下，於訓練階段設定停留時間為旋轉兩圈為 160 秒，在定位階段分別有固定與轉半圈為 40 秒以及旋轉一圈為 80 秒。重複測量的步驟直到完成以上的定位實驗。

(2) 執行定位程式

根據該實驗收到的多筆回傳強度輸入程式中，來進行定位演算，根據歐幾里德公式與最近鄰居法之計算，即能顯示定位結果。

(3) 紀錄定位結果及統計

根據不同的實驗設計，分別記錄定位的結果，待實驗完成以後再統計其定位的準確度。

2.1 訊號強度資料庫建立

在訓練階段，本實驗將室內空間共規畫成 66 個訓練點，依序對每一個訓練點進行實地量測，透過定位標籤在每點停留約 160 秒，同時對 6 個感測節點擷取訊號強度，大約每個感測節點至少可被測得 100 個訊號強度值，接著取其平均數作為該訓練點的特徵值，最後完成全部訓練點所對應感測節點的訊號強度資料庫。在建置訊號強度資料庫的實務上，由於量測的地點越密集，該法的定位準確度也會相對上升，所以通常需要花費極長的時間實地測量各個訓練點，本文將透過不同的實測數量來建立兩種資料庫，比較其對定位準確度的影響，期望可以透過內插方式模擬資料庫，應用在允許定位誤差較大

的需求上，以減少環境實測訓練點之數量，進而節省強度資料庫建立所需時間。實驗中為避免因方向性差異導致訊號的衰減，將透過一個可自動旋轉的轉盤帶動定位標籤（轉盤轉一圈的時間為 80 秒，故每一個感測節點平均可接收到 70~80 筆訊號強度值），然後將收集的資料經過處理，再將其建立成為資料庫。圖 13 則是在訓練階段時建立資料庫的實作流程，共可分為實測式（全部測量，共 66 點）與模擬式（跳格測量，66 點取 24 點）兩種，實驗方法將分別介紹如下：

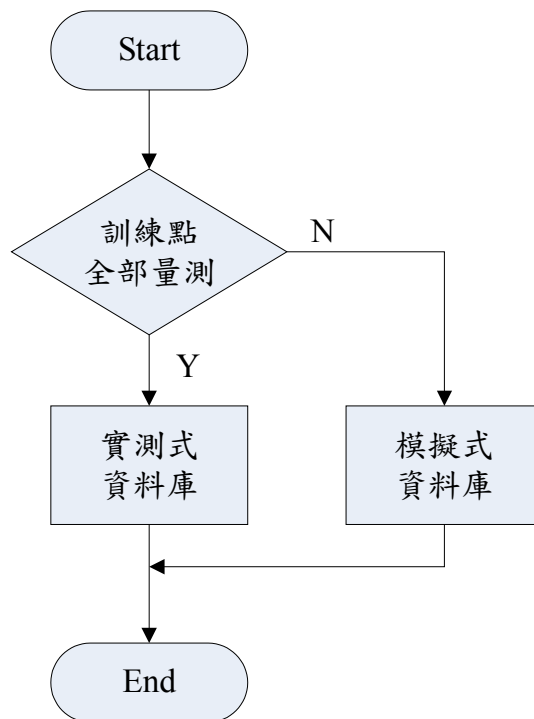


圖 13：資料庫建立之實作流程圖

(1) 實測式資料庫

全部實地測量 66 個訓練點，如圖 14 所示的 B1、B2...B6 至 L1、L2...L6，每一點皆可對應到 6 個感測節點所回傳的訊號強度資料，並將其視為該點之特徵值。

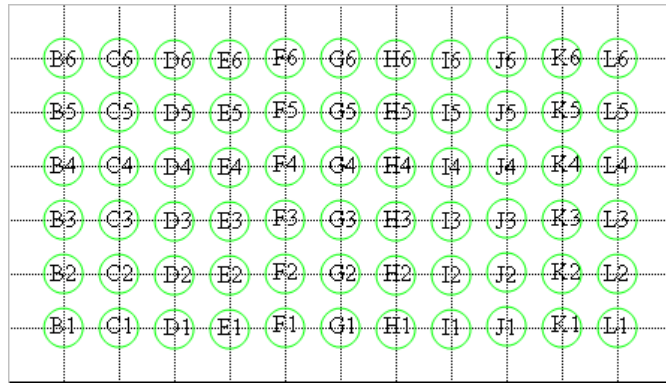


圖 14：全部測量示意圖

(2) 模擬式資料庫

以跳格實地測量方式，相對位置如圖 15 所示，每間隔一格（60 公分）實地測量訓練點之資料，並利用內插法取相鄰兩點之平均值模擬得到該點之訊號強度值。如圖 10 中的 C1 是由實測 B1 與 D1 並加總取其平均值而得到，B2 則是由 B1 與 B3 加總取其平均值而得，依此類推。

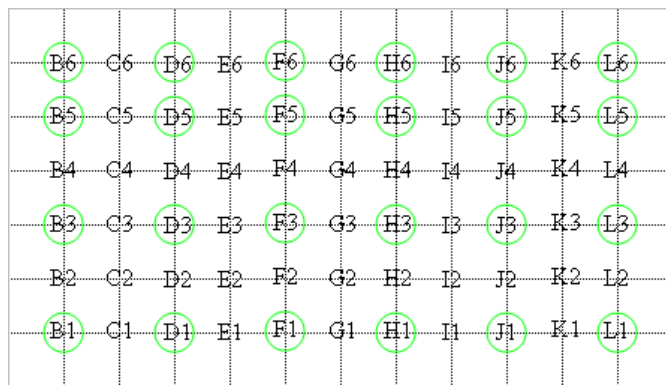


圖 15：跳格測量示意圖

2.2 定位訊號取樣設計

由於無線訊號在傳輸上會因方向性影響接收訊號的強弱，故本研究在定位階段所需比對樣本之取樣方法上，分別採用固定與旋轉定位標籤之方式，

實作流程如圖 16 所示，實驗中透過轉盤控制定位標籤可以不旋轉或者定速地旋轉，然後分析不同定位訊號強度取樣方式對定位準確度的影響，此外，為驗證方向性對接收訊號強弱之影響，實驗中增加僅旋轉半圈的方式，比較是否可以改善固定定位標籤所受到之單一方向極端值的影響，最後以實驗結果之最佳取樣方式為基礎，模擬在真實環境中，考量人體移動對訊號干擾的影響程度。

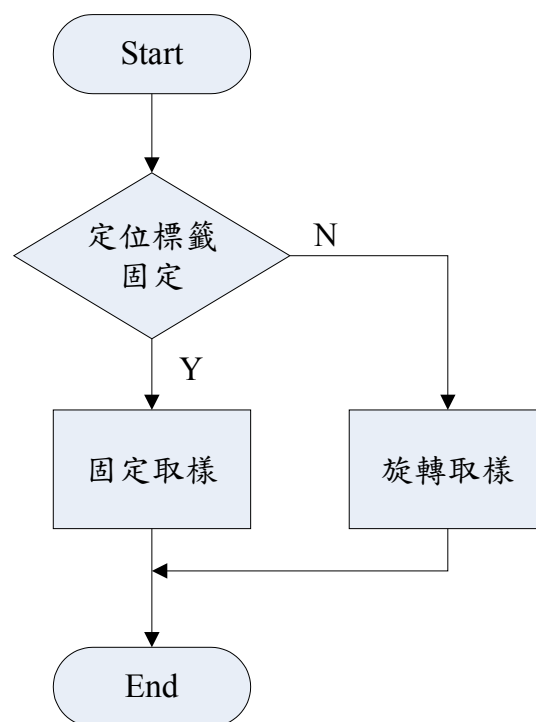


圖 16：定位訊號取樣之實作流程圖

在實驗的過程中，我們依據不同的定位標籤取樣方式共分成四組實驗設計，如表 4 所示，其中以固定定位標籤的取樣方式為對照組，並透過不同的定位訊號強度取樣條件分成三個實驗組，進行定位準確度之比較與使用模擬式資料庫之效能分析。

表 4：實驗設計

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
定位標籤 取樣方式	固定	轉半圈	轉一圈	轉一圈 (人體干擾)

第三節 定位演算法

本文採用之定位技術為訊號特徵比對法。在定位演算法的訓練階段中，利用欲定位環境各訓練點的訊號特徵值建立一個資料庫，並於定位階段時，將定位標籤收到的即時訊號強度與資料庫所有訓練點的訊號強度做比對，透過歐幾里德 (Euclidean distance) 距離公式 (如公式 4) 進行計算，即可得到多個候選地點，然後找出此距離之最小值即被判定為定位標籤最有可能的座標位置。例如：目標位置量測值為 (80, 95, 110)，若訓練點 A 為 (70, 80, 95)，訓練點 B 為 (75, 95, 105)，經歐幾里德距離公式計算後，求得訓練點 B 之距離值為最小，即判定為使用者所在位置。

$$E_dis_A = \sqrt{(70 - 80)^2 + (80 - 95)^2 + (95 - 110)^2} = 23.45$$

$$E_dis_B = \sqrt{(75 - 80)^2 + (95 - 95)^2 + (105 - 110)^2} = 7.07$$

$$E_dis_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (RSS_i - RSS_i')^2} \quad (4)$$

其中 RSS_i 代表資料庫中的訊號強度，則 RSS_i' 代表定位標籤實測點的即時訊號強度， n 表示感測節點的數量， i 則為感測節點的編號。歐幾里德距離值

越小，代表該點量測強度與樣本強度相似度越高，值越大則表示相似度越小。

在定位演算方法上，實驗數據亦輔以最近鄰居法 (K-Nearest Neighbors, KNN) 來分群，這是一種基於「物以類聚」原理的分類技術，用以修正定位計算的結果，避免只考慮一個訓練點當作最終定位結果的風險，即利用歐基里得距離公式計算，求得定位標籤對應各訓練點的距離值之後，挑選其中三個最小的值作為最接近實際位置之集合，取此三點集合的平均值則推估為可能的定位地點 [28][29][30]，如公式 5。

$$pre(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 \frac{1}{E_dis_k + \varepsilon} * (X_i, Y_i)}{\sum_{k=1}^3 \frac{1}{E_dis_k + \varepsilon}} \quad (5)$$

公式 5 式中， $pre(X, Y)$ 代表定位階段後得出的估計座標位置，則 E_dis_k 表示歐幾里德距離值，用來比較實測點的即時訊號強度與資料庫的相似度， ε 表示一個極小的數值，為避免分母出現 0 的情況。 (X_i, Y_i) 表示被挑選的三個最小值候選集合中所代表的座標值。

第五章

實驗結果及分析

在實驗中，透過固定取樣方式來移動定位標籤進行訊號強度與距離的實際量測，分別與兩個感測節點（節點A與F）之間的相對距離由0公分移動至600公分，取樣率為每60公分擷取一次訊號強度，最後得到如圖17之訊號強度與距離關係，由圖中可以發現，當訊號強度越強，越容易對應到唯一的距離。並且訊號強度出現隨著距離的增加而衰減之趨勢，以及訊號曲線呈現不規則跳動的情形。這是因為在定位環境中，存在著無法控制的外在因素干擾與無線電波本身特性所導致。

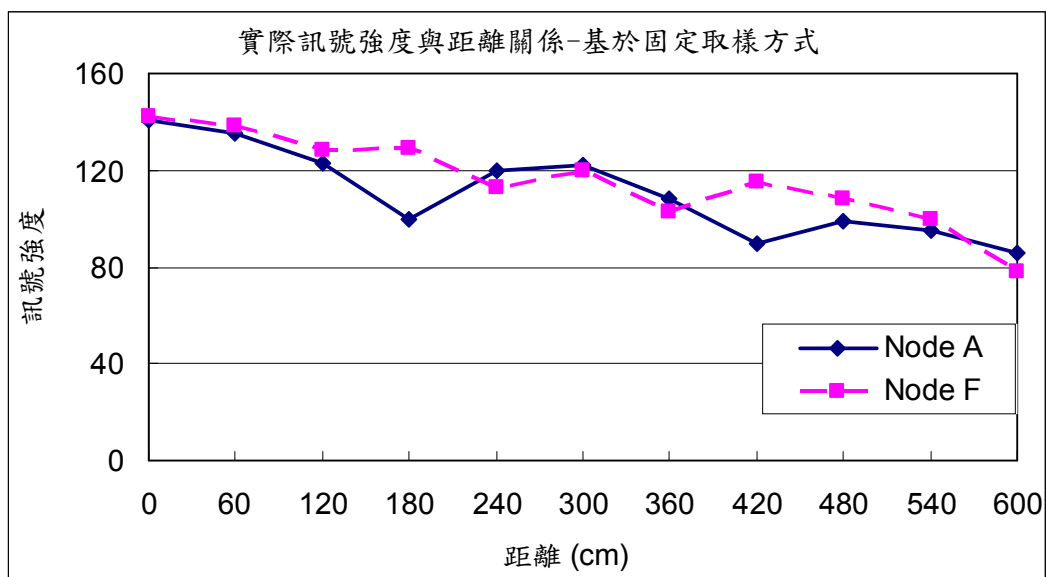


圖 17：訊號強度與距離關係圖

第一節 模擬式資料庫之效能分析

如圖 18 的結果可發現到，使用模擬式取代實測式資料庫時，對於 Case 1 會降低對定位的準確度 19%，其定位誤差由 84 公分增加到 100 公分，但對 Case 3 則無顯著影響，其定位誤差由 65 公分變動為 67 公分，此結果說明訊號強度與距離的關係在不受方向性的影響之下，可遵循無線電訊號隨著距離衰減的特性曲線，即透過旋轉取樣與模擬式資料庫做比對之結果，並不會影響定位準確度。相較之下，本研究使用 66 個訓練點取 24 點實測的方式，其餘利用內插法來模擬剩下節點之訊號強度，可節省約 50%~60% 的建置時間，且此法對於室內空間越大之情況而言，於訓練階段所節省之時間效益則越大，可免去環境訓練點需要全部實地量測之麻煩。

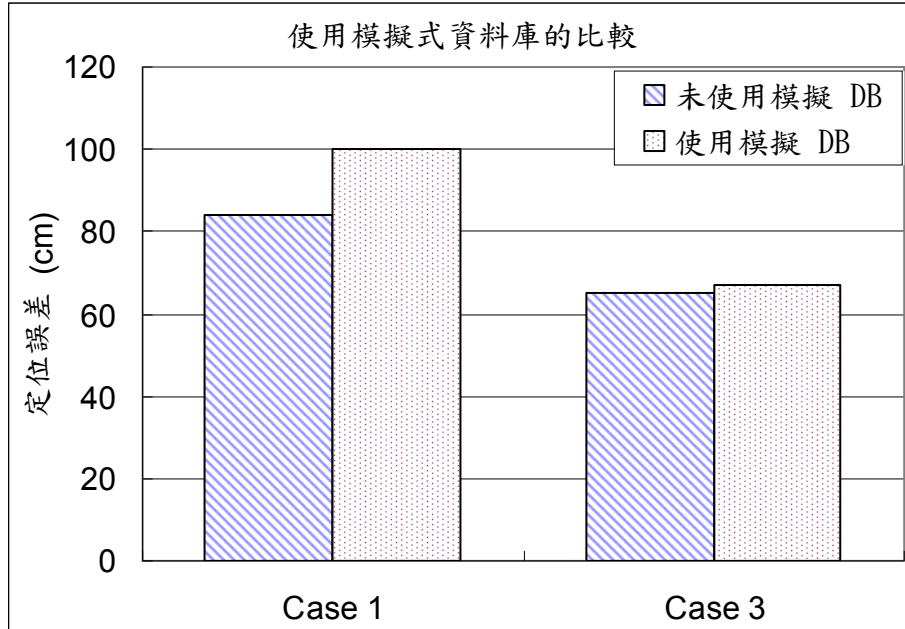


圖 18：使用模擬式資料庫的比較

第二節 取樣方法之準確度比較

如圖 19 所示，將定位標籤在目標位置停留 40 秒，分別採用固定與旋轉半圈取樣的方法，於定位的準確度上無顯著差異，其定位誤差由 84 公分變更為 88 公分，這可能是因為旋轉半圈取樣仍受到方向性的影響，在另外半圈方向感測節點所接收之訊號強度可能相對較微弱，而無法改善固定取樣所造成的誤差，但若利用定位標籤以旋轉一圈廣播定位訊號，則可提升定位預測的準確度 22%，其定位誤差由 84 公分降低到 65 公分。

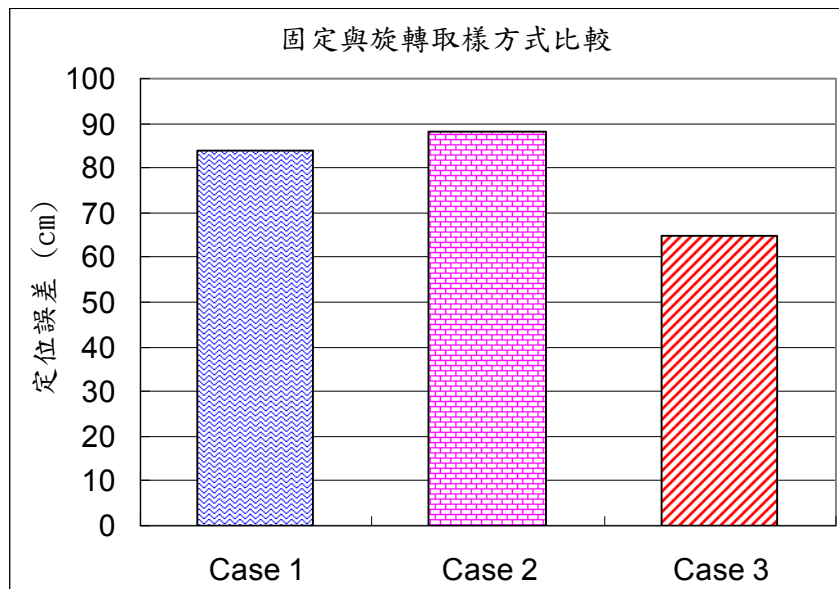


圖 19：固定與旋轉定位標籤方式比較

本實驗最後以最佳取樣方式為前提，模擬在真實環境中，考量人體移動對訊號的影響，即利用旋轉取樣的方式，增加兩個人於定位標籤 90 公分範圍內來回移動，由圖 20 發現在 Case 3 如果加上人體的干擾，會降低對定位的準確度 44%，其定位誤差由 65 公分增加到 94 公分。

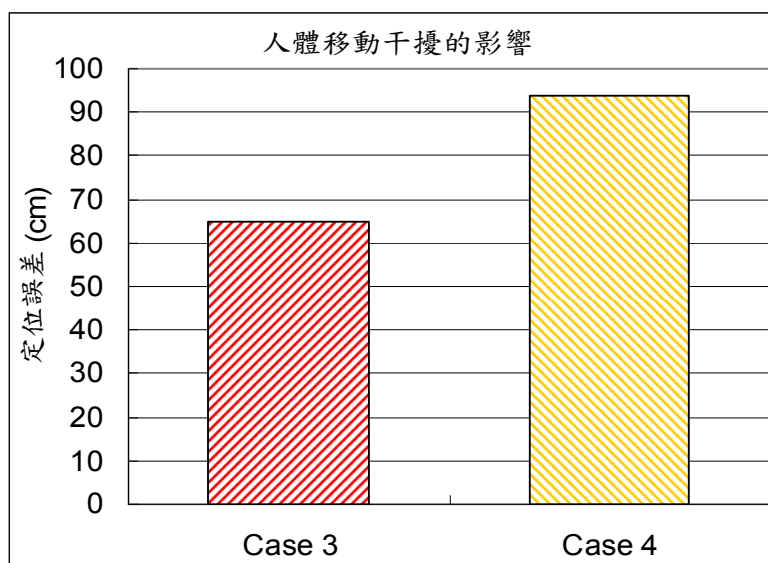


圖 20：環境中人體移動干擾的影響

圖 21 為本文實驗結果的綜合比較，圖中可發現 Case 3 定位的準確度最高，定位誤差約為 65 公分。其次為 Case 1 與 Case 2，定位誤差於 84 公分至 88 公分之間。而準確率最低的是 Case 4，因人體干擾而造成定位誤差會增加到 94 公分。

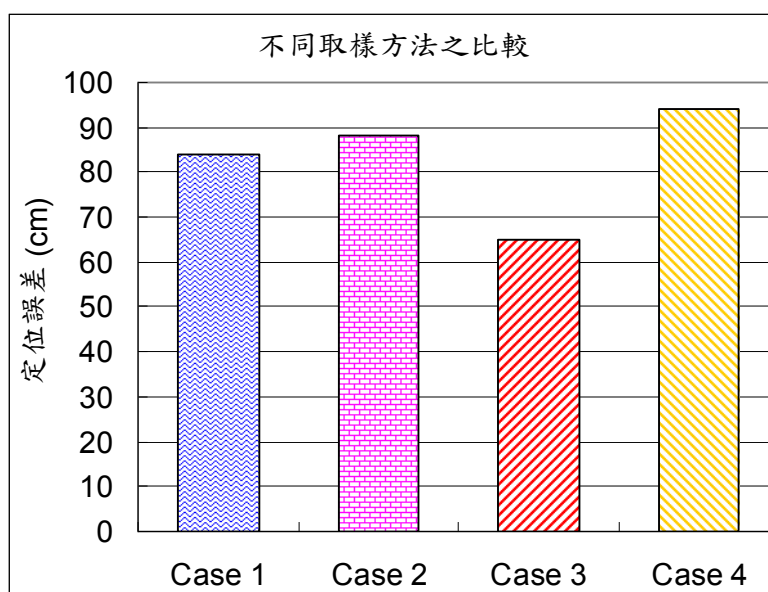


圖 21：取樣方法之準確度比較

以下圖 22、圖 23 及圖 24 分別呈現不同取樣方式所對應之定位誤差分布情形，在本實驗 6x3 公尺的室內空間中，由於周圍有書櫃與電腦等設備擺飾，造成訊號可能因多路徑反射與繞射之干擾，導致定位誤差極大值容易發生在四周位置。

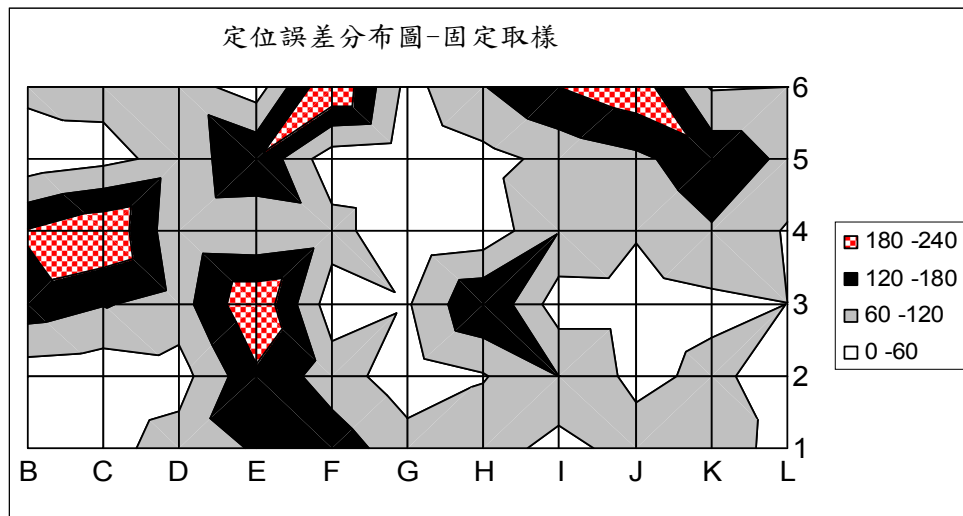


圖 22：定位誤差分布圖-Case 1

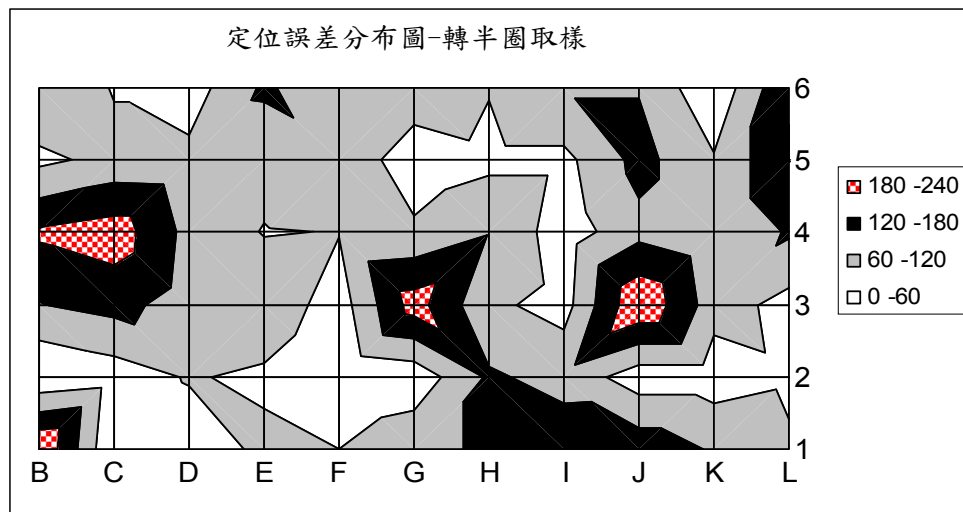


圖 23：定位誤差分布圖-Case 2

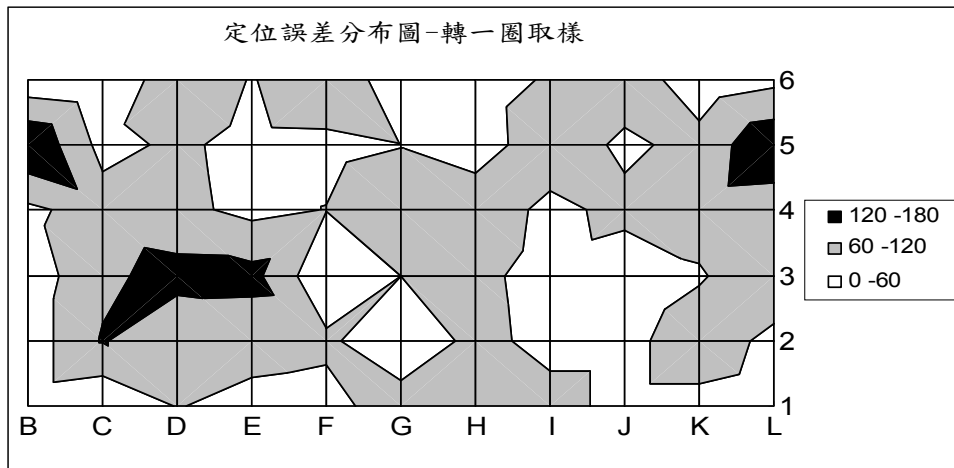


圖 24：定位誤差分布圖-Case 3

圖 25 則為三種不同取樣方式之定位誤差分布比例之比較，由圖中可得知，Case 3 中有 52% 的定位誤差可控制在 60 公分以下，有 41% 的定位誤差可控制在 61~120 公分區間，並可避免 Case 1 與 Case 2 發生大於 180 公分定位誤差的情形，其中又以 Case 1 容易出現超出 240 公分極大值的定位誤差。

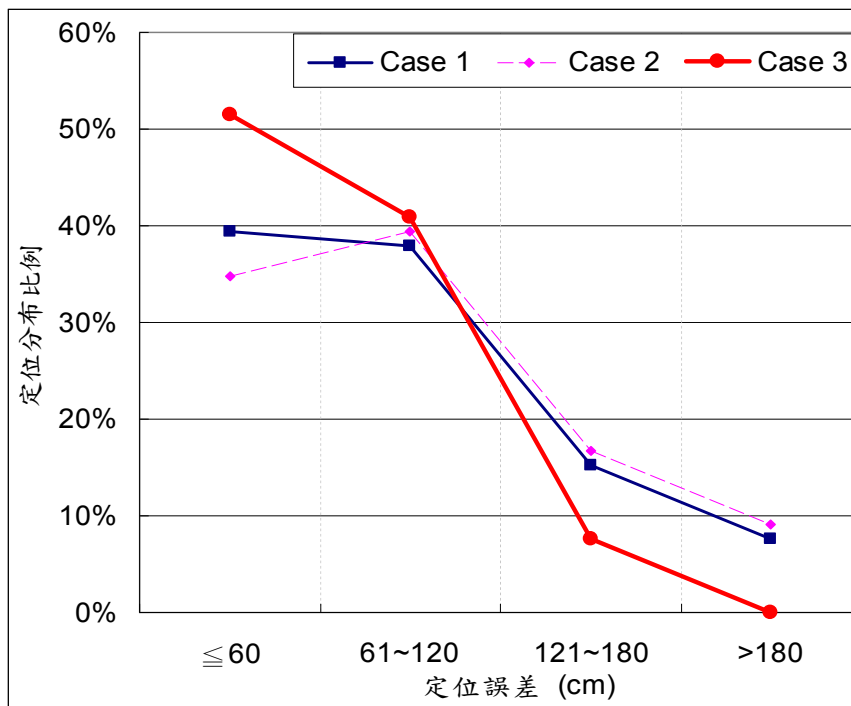


圖 25：取樣方法之定位分布比較

第陸章

成果討論與結論

第一節 實驗成果討論

根據本研究結果，針對訊號特徵比對法的訓練階段，我們透過跳格實測訊號強度，並利用內插方式計算剩餘訓練點來建立模擬式資料庫，對於允許定位誤差較大的應用之下，能節省建置資料庫 50%~60%所需要的時間支出，並且針對使用定位標籤旋轉一圈的取樣方式，可以改善使用模擬式資料庫所造成的定位損失，而不會明顯影響定位準確度，能夠成功地取代實測式資料庫建置所需要的時間花費。

在定位階段，我們分別在三種不同的定位訊號取樣方式下進行實驗，由實驗結果發現 Case 3 的定位結果最為優良，相對於一般固定取樣的方式，透過旋轉一圈取樣方式來預測定位座標，可提升定位的準確度 22%，並且其地點預測準確度有 52% 的定位誤差可控制在 60 公分以下，因此可推斷 Case 3 對小空間的室內定位而言，是較佳的定位訊號取樣方式。此外，以 Case 3 作為依據，我們發現定位標籤在無線傳輸的環境中，如果受到人體在周圍移動的干擾，將會降低對定位的準確度 44%。

第二節 結論

在未來室內定位的應用上，針對訊號特徵比對法之相關研究方面，希望能藉由本論文的實驗成果，提供在訓練與定位兩階段之設計與實作參考。在訊號資料庫建置的流程設計上，由於此階段最麻煩的是必須實地量測每一個訓練點，在實作的過程顯得十分費工與耗時，所以建議以定位環境之變化與不同定位精度需求的前提下，考慮是否選用模擬式資料庫取代實測式資料庫的方法，期望能在定位時以使用者所在環境對應至最適合的資料庫來進行比對運算。另外，針對定位階段之訊號強度的取樣方法，我們建議可依據不同定位精度的應用需求，對應定位標籤設計不同的定位訊號取樣方法，以求最大經濟效益，且由實驗結果證明，定位標籤在取樣方法設計的實務上，必須考量實際人體干擾對定位誤差之影響。

參考文獻

- [1] A. M. Ladd, "Using Wireless Ethernet for Localization," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland*, Sep. 2002, pp. 402-408.
- [2] L. Yu, N. Wang, and X. Meng, "Real-time Forest Fire Detection with Wireless Sensor Networks," *Wireless Communications Networking and Mobile Computing*, vol. 2, 2005, pp. 1214-1217.
- [3] A. Cerpa, J. Elson, M. Hamilton, and J. Zhao, "Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology," *Workshop on Data communication in Latin America and the Caribbean*, 2001.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey," *Computer Networks* 38, 2002, pp. 393-422.
- [5] A. Milenkovic, C. Otto, and E. Jovanov, "Wireless Sensor Networks for Personal Health Monitoring: Issues and an Implementation," *Computer Communications*, vol. 29, no. 13, Aug. 2006, pp. 2521-2533.
- [6] P. Enge, P. Misra, "Special Issue on GPS: The Global Positioning System," *Proceeding of the IEEE*, vol. 87, no. 1, Jan. 1999, pp. 3-15.
- [7] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. L. Moses, and N. S. Correal, "Locating the Nodes: Cooperative Localization in Wireless Sensor Networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, July. 2005, pp. 54-69.
- [8] E. Callaway, P. Gorday, L. Hester, J. A. Gutierrez, M. Naeve, B. Heile, and V. Bahl, "Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for

- Low-rate Wireless Personal Area Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, Aug. 2002, pp. 70-77.
- [9] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. S. Raghavendra, “Performance Evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for Low-rate Low-power Wireless Networks,” *IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications*, 2004, pp. 701-706.
- [10] S. Safaric, K. Malaric, “ZigBee Wireless Standard,” *International Symposium*, June. 2006, pp. 259-262.
- [11] P. Kinney, “ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works,” *Communications Design*, Oct. 2003.
- [12] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher, “Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks,” *ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2003.
- [13] 蘇木春, 謝定龔, “CDMA 手機定位研究與實作,” 國立中央大學資訊工程學系碩士論文, 2006.
- [14] R. Roberts, “IEEE 802.15 Wireless Personal Area Networks: Ranging Subcommittee Final Report,” *Harris Corporation*, 2004.
- [15] T. Y. Chen, C. C. chiu, and T. C. Tu, “Mixing and Combining with AOA and TOA for the Enhanced Accuracy of Mobile Location,” *Personal Mobile Communications*, 2003, pp. 276-280.
- [16] M. Heidari, “Identification and Modeling of the Dynamic Behavior of the Direct Path Component in TOA-based Indoor Localization Systems,” *Electrical & Computer Engineering, Worcester Polytechnic Institute*, May.

2008.

- [17] S. Venkatraman, J. Caffery, and H. R. You, "A Novel TOA Location Algorithm Using Los Range Estimation for NLos Environments," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 5, 2004, pp. 1515-1524.
- [18] L. Cong, W. Zhuang, "Hybrid TDOA/AOA Mobile User Location for Wideband CDMA Cellular Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no. 3, July. 2002, pp. 439-447.
- [19] M. Bocquet, C. Loyez, and A. B. Delaï, "Using Enhanced-TDOA Measurement for Indoor Positioning," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 10, Oct. 2005, pp. 612-614.
- [20] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. L. Moses, and N. S. Correal, "Locating the Nodes: Cooperative Localization in Wireless Sensor Networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, 2005, pp. 54-69.
- [21] 江振瑞, 徐翊嘉, "無線感測網路旋轉指向天線定位法," 國立中央大學資訊工程學系碩士論文, 2010.
- [22] R. Peng, M. L. Sichitiu, "Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks," *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2006, pp. 374-382.
- [23] D. Niculescu, B. Nath, "Ad Hoc Positioning System Using AOA," *Computer and Communications*, vol. 3, 2003, pp. 1734-1743.
- [24] M. Lihan, H. Sawano, T. Tsuchiya, and K. Koyanagi, "Comparison of Orientation-aware RSS-based Localization Algorithms," *Mobility Conference*,

no. 100, 2008.

- [25] C. Papamanthou, F. P. Preparata, and R. Tamassia, "Algorithms for Location Estimation Based on RSSI Sampling," *Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks*, July. 2008, pp. 72-86.
- [26] 曾黎明,李科鋒,“使用行動定位裝置協助感測器定位的經濟路程策略,”
國立中央大學資訊工程學系碩士論文, 2006.
- [27] P. Bahl, V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based User Location and Tracking System," *IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 2, 2000, pp. 775-784.
- [28] K. Beyer, J. Goldstein, R. Ramakrishnan, U. Shaft, "When Is " Nearest Neighbor" Meaningful?,"*Lecture Notes in Computer Science*, 1999, Volume 1540/1999, pp.217-235.
- [29] T. Seidl, H. P. Kriegel, and H. Corporation, "Optimal Multi-Step k-Nearest Neighbor Search," *ACM SIGMOD*, 1998.
- [30] S. A. DUDANI, "The Distance-weighted K-Nearest Neighbor Rule," *IEEE Transactions*, vol. 6, Apr. 1976, pp. 325-327.